



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV PROCESNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

INSTITUTE OF PROCESS ENGINEERING

**VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA Z PRŮMYSLOVÝCH  
PROCESŮ**

LOW-GRADE HEAT RECOVERY IN INDUSTRIAL PROCESSES

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Michal Novák**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Martin Havlásek**

**BRNO 2016**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav procesního inženýrství  
Student: **Michal Novák**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Martin Havlásek**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Využití odpadního tepla z průmyslových procesů

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na využívání odpadního tepla z průmyslových procesů. Jedná se o nízkopotenciální teplo v teplotním rozsahu 30 – 250 °C, které je v průmyslové praxi velmi často odváděno z procesu jako odpadní proud. Tento proud je přitom nositelem velkého množství energie, která může být do procesu vrácena nebo využita jinde. Mezi základní zařízení pro využití nízkopotenciálního tepla patří např. tepelná čerpadla, sorpční systémy, systémy pro předehřev procesních médií nebo sušicí procesy. Výrobu elektřiny z odpadního tepla umí zajistit např. organický Rankinův cyklus (ORC).

### Cíle bakalářské práce:

Rešerše problematiky odpadního tepla a teorie přenosu tepla s ní související  
Rešerše zařízení využívající odpadní teplo s důrazem na tepelná čerpadla  
Případová studie integrace zařízení využívající odpadní teplo do stávajícího provozu

### Seznam literatury:

BCS Incorporated (2008): Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U. S. Industry, prepared for the U.S. Department of Energy, Industrial Technologies Program.

Industrial Energy Division: Waste Heat Recovery, Department of Energy, Mines and Resources, Ottawa, Canada.

BARTOŠEK, N. Analýza potíží výměníku tepla. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 95 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Bohuslav Kilkovský, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Petr Stehlík, CSc., dr. h. c.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Bakalářská práce je zaměřena na možnosti využití odpadního tepla z průmyslových procesů. Počáteční část se zabývá teoretickým úvodem do problematiky přenosu tepla. V další části jsou uvedeny nejčastější zdroje odpadního tepla. Ve třetí části práce jsou shrnuty metody pro využití odpadního tepla. Poslední, praktická část ukazuje zavedení systému na využití odpadního tepla do reálného provozu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Odpadní teplo, tepelné čerpadlo, výměník tepla, ORC, Organický Rankinův cyklus, zdroje odpadního tepla

## ABSTRACT

The bachelor thesis is focused on the waste heat recovery options from industrial processes. The first part is the theoretical introduction into the problematics of the heat transfer. In the next part the most common waste heat sources are presented. The third part summarizes the methods for waste heat recovery. The last, practical part presents the implementation of the waste heat recovery system into the real operation.

## KEY WORDS

Waste heat, heat pump, heat exchanger, ORC, Organic Rankine Cycle, waste heat sources

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

Novák, M. *Využití odpadního tepla z průmyslových procesů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství 2016. 36 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Martin Havlásek.

## ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Já, Michal Novák, prohlašuji, že jsem bakalářskou práci *Využití odpadního tepla z průmyslových procesů* vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Martina Havlásky a že jsem uvedl všechny použité prameny a literaturu.

V Brně dne 25. května 2016

---

Michal Novák

## PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu bakalářské práci Ing. Martinu Havláskovi za vstřícný přístup, cenné rady a připomínky, které mi dopomohly k dokončení této bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval mé přítelkyni a celé rodině za podporu během studia.



# OBSAH

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ .....	9
1. ÚVOD .....	11
2. TEORETICKÝ ZÁKLAD .....	11
2.1 PŘENOS TEPLA .....	12
2.1.1 Přenos tepla vedením .....	12
2.1.2 Přenos tepla prouděním.....	12
2.1.3 Přenos tepla zářením .....	13
2.1.4 Tepelná bilance .....	13
2.1.5 Přenosová rovnice .....	14
2.1.6 Součinitel prostupu tepla.....	14
2.1.7 Střední teplotní rozdíl .....	15
2.1.8 Podobnostní čísla .....	15
2.2 ODPADNÍ TEPLA.....	16
2.2.1 Zdroje odpadního tepla .....	16
2.2.2 Možnosti použití .....	19
2.2.3 Využitelnost odpadního tepla .....	20
2.3 METODY VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA.....	23
2.3.1 Tepelné výměníky .....	23
2.3.2 Tepelná čerpadla .....	25
2.3.3 ORC jednotky .....	27
2.3.4 Tepelné trubice.....	28
2.3.5 Termoelektrické generátory .....	28
3. PRAKTICKÁ ČÁST .....	29
3.1 PŘÍPADOVÁ STUDIE INTEGRACE ZAŘÍZENÍ NA VYUŽITÍ ODPADNÍHO TEPLA V PRŮMYSLOVÉM PODNIKU .....	29
3.1.1 Popis problému .....	29
3.1.2 Návrh řešení vytápění .....	30
3.1.3 Finanční návratnost projektu.....	31
3.1.4 Vyhodnocení projektu.....	32
4. ZÁVĚR.....	33
SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....	34
SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK .....	36

## SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Symbol	Význam	Jednotka
$\dot{Q}$	tepelný tok	[W]
$\dot{q}$	měrný tepelný tok	[W/m <sup>2</sup> ]
$\lambda$	tepelná vodivost	[W/m.K]
A	plocha	[m <sup>3</sup> ]
t	teplota	[°C]
$\alpha$	součinitel přestupu tepla	[W/m <sup>2</sup> .K]
$t_f$	teplota proudící tekutiny	[°C]
$t_w$	teplota stěny omývané proudící tekutinou	[°C]
$\sigma$	Stefan-Boltzmannova konstanta	[W/(m <sup>2</sup> .K <sup>4</sup> ) ]
$A_\sigma$	povrch dokonale černého tělesa	[m <sup>2</sup> ]
T	teplota dokonale černého tělesa	[°C]
$\dot{m}$	hmotnostní průtok látky	[kg/s]
$c_p$	střední měrná tepelná kapacita	[J/(kg.K)]
MP	mezitrubkový prostor	
TP	trubkový prostor	
in	vstupní hodnoty	
out	výstupní hodnoty	
k	součinitel prostupu tepla	[W/m <sup>2</sup> .K]
$\Delta T_m$	střední teplotní rozdíl	[°C]
A	referenční plocha výměny	[m <sup>2</sup> ]
R	tepelný odpor	[K.m <sup>2</sup> .W <sup>-1</sup> ]
$\delta$	tloušťka stěny	[m]
$\Delta T_{ln}$	střední teplotní logaritmický spád	[-]
F	opravný součinitel středního logaritmického teplotního rozdílu	[-]
min	minimální hodnota	
max	maximální hodnota	
$\dot{E}$	ztráty odpadního tepla	[W/s]

---

$h(t)$	měrná entalpie v závislosti na čase	[J]
P	tlak	[Pa]
ORC	Organický Rankinův cyklus	
ČOV	čistírna odpadních vod	
TUV	teplá užitková voda	
TČ	tepelné čerpadlo	[-]
COP	coefficient of performance, topný faktor	

## 1. ÚVOD

Technologie používané ve většině průmyslových odvětví mají jako vedlejší produkt odpadní teplo. Toto odpadní teplo se v minulosti ve většině případů nikterak nevyužívalo, jelikož náklady na elektřinu byly vůči pořizovacím nákladům na systém využívající odpadní teplo zanedbatelné a ekologické povědomí na velmi nízké úrovni. Mnohé firmy v dnešní době však zjistily, že odpadní teplo může být zdrojem velkých úspor.

V České Republice se v roce 2014 vyprodukovalo minimálně 17,4 TWh [6] energie ve formě odpadního tepla, které odchází z procesů nevyužito. Snahou této bakalářské práce je ukázat možné technologie pro využívání odpadního tepla z průmyslových procesů, s nimiž jde ruku v ruce vylepšení ekonomické situace podniků a snížení zátěže na životní prostředí.

V teoretické části bakalářské práce je uvedena teorie přenosu tepla a nastíněna metodika výpočtů výměníků tepla. Dále pak práce rozebírá nejčastější zdroje odpadního tepla a ukazuje známé metody jejich využití s důrazem na tepelná čerpadla, u kterých je proveden detailnější rozbor, včetně popisu jejich funkcí, výhod a nevýhod.

Praktická část práce se zabývá případovou studií Integrace zařízení na využití odpadního tepla v chemickém závodě společnosti Kemifloc a.s. Na konkrétním případě je ukázáno využití odpadního tepla z výrobního procesu pro ohřev budov v chemickém podniku.

## 2. TEORETICKÝ ZÁKLAD

Teoretické znalosti přenosu tepla jsou základem téměř každé technologie využívající odpadní teplo jako zdroj své energie. Bez správného pochopení základních principů přenosu tepla je velmi těžké, ne-li zcela nemožné, analyzovat a vyhodnocovat případné technologické možnosti systémů či nabídky různých dodavatelů pro využívání odpadního tepla. Pro lepší pochopení je tedy dobré disponovat znalostmi teorie přenosu tepla, včetně některých elementárních výpočtů. V této kapitole jsou popsány veličiny a obecné výpočetní vztahy vztahující se k přenosu tepla.

### 2.1 Přenos tepla

Přenos tepla je děj, popisující výměnu tepelné energie mezi dvěma, eventuálně více látkami. Hybnou silou přenosu tepla je teplota. Dle druhého termodynamického zákona se teplo šíří z místa o vyšší teplotě do míst s nižší teplotou a to samovolně. Na základě fyzikálních principů a taktéž daného prostředí, ve kterém děj probíhá, rozdělujeme přenos tepla na přenos vedením, prouděním a sáláním.

#### 2.1.1 Přenos tepla vedením

Přenos tepla vedením taktéž kondukcí probíhá především ve spojitém látkovém prostředí, v tomto případě v pevných látkách. V kapalně či plynné fázi dochází k přenosu tepla primárně vedením pouze v případě, že jsou tyto látky v klidu. Molekuly či jiné stavební částice látky si předávají navzájem kinetickou energii neuspořádaných tepelných pohybů, která se tak přenáší z míst o vyšší teplotě do míst s nižší teplotou. Intenzita přenosu tepla je definována tepelným tokem dle Fourierova zákona [1]:

$$\dot{Q} = -\lambda \cdot A \cdot \text{grad}(t), \text{ popřípadě } \dot{q} = -\lambda \cdot \text{grad}(t) \quad (2.1)$$

kde

$\dot{Q}$  ... tepelný tok (výkon výměny tepla) [W]

$\dot{q}$  ... měrný tepelný tok (hustota tepelného toku) [W/m<sup>2</sup>]

$\lambda$  ... tepelná vodivost [W/m.K]

$A$  ... plocha [m<sup>2</sup>]

$\text{grad } t$  ... gradient teplotního pole [°C]

#### 2.1.2 Přenos tepla prouděním

Přenos tepla prouděním taktéž konvekcí je dalším způsobem přenosu a jeho předpokladem je rovněž spojitě látkové prostředí. Probíhá ovšem jen v proudící tekutině, tj. kapalina nebo plyn. Hranicí systému bývá většinou stěna trubky případně jiná teplosměnná plocha. Mechanismem výměny tepla u proudění je mísení molekul tekutiny o rozdílné teplotě. Vznikne-li mezi místem ohřevu a místem ochlazení v tekutině teplotní rozdíl, ohřívána a tedy lehčí část tekutiny stoupá, při vytlačování ochlazené těžší části. Tím vzniká v tekutině proudění, kterého se využívá k přenosu např. v ústředním topení. Můžeme rozlišovat konvekci nucenou (vyvolanou čerpadlem, ventilátorem, apod.), konvekci přirozenou neboli volnou (vlivem změny hustoty v závislosti na teplotě) a konvekci kombinovanou. Obecně platí, že nucená konvekce

je vždy doprovázena konvekcí přirozenou, avšak ta se velmi často zanedbává pro svou malou „sílu“. Intenzitu sdílení tepla prouděním charakterizuje Newtonův zákon [1]:

$$\dot{Q} = \alpha \cdot A \cdot (t_f - t_w), \text{ popřípadě } \dot{q} = \alpha \cdot (t_f - t_w) \quad (2.2)$$

kde

$\alpha$ ... součinitel přestupu tepla [W/m<sup>2</sup>.K]

$t_f$ ... teplota proudící tekutiny [°C]

$t_w$ ... teplota stěny omývané proudící tekutinou [°C]

Přenos tepla prouděním je znatelně složitější, nežli přenos tepla vedením. Při proudění tekutiny je třeba uvažovat současně rovnici kontinuity, energetickou, pohybovou a okrajové podmínky teplotních a rychlostních polí. Pro řešení konvekce je využívána teorie podobnosti. Tato umožňuje získat rozložení teplotních polí, nebo přímo součinitel přestupu tepla  $\alpha$  [1].

### 2.1.3 Přenos tepla zářením

Přenos tepla zářením taktéž radiací nebo sáláním, je vyvolán důsledkem elektromagnetického vlnění. Elektromagnetické vlnění vyzařuje každá částice (pevné látky, kapaliny, plynu) a stejně tak jej i absorbuje. K přenosu tepla sáláním není potřeba hmotné prostředí, takto se k nám dostává např. teplo ze Slunce. Sdílení tepla zářením definuje Stefan-Boltzmanův zákon, pro dokonale černé těleso (těleso, které veškeré záření absorbuje a současně při dané teplotě maximum záření emituje) platí [1]:

$$\dot{Q} = \sigma \cdot A_\sigma \cdot T^4, \text{ popřípadě } \dot{q} = \sigma \cdot T^4 \quad (2.3)$$

kde

$\sigma$ ... Stefan-Boltzmannova konstanta [W/(m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>) ]

$A_\sigma$  ... povrch dokonale černého tělesa [m<sup>2</sup>]

$T$ ... teplota dokonale černého tělesa [K]

Ačkoliv se v praxi podílí na přenosu tepla všechny tři složky zároveň, jedna nebo dvě ve většině případů převládají. Při výpočtech je tudíž možné ostatní složky přenosu zanedbat a výpočet značně usnadnit.

### 2.1.4 Tepelná bilance

Na základě zákona zachování energie můžeme pro uzavřenou soustavu uvažovat[2]:

$$vstup = výstup (+akumulace) + ztráty \quad (2.4)$$

Při výpočtech výměníků a zanedbání ztrát se vychází z rovnice tepelné bilance[2]:

$$\dot{Q}_{vstup} = \dot{Q}_{výstup} \quad (2.5)$$

Při předpokladu jednofázové výměny tepla můžeme uvažovat, že určité množství tepla, je přenášeno z teplejší na chladnější pracovní látku, pak přenesenému teplu odpovídá změna teplot těchto látek [2]:

$$\dot{m}_{MP} \cdot \overline{c_{p,MP}} \cdot (t_{MP,in} - t_{MP,out}) = \dot{m}_{TP} \cdot \overline{c_{p,TP}} \cdot (t_{TP,out} - t_{TP,in}) \quad (2.6)$$

kde

$\dot{m}_{MP}, \dot{m}_{TP}$  ... hmotnostní průtok látky [kg/s]

$\overline{c_{p,MP}}, \overline{c_{p,TP}}$  ... střední měrná tepelná kapacita [J/(kg.K)]

$t_{MP,in}, t_{TP,in}$  ... vstupní teplota proudu [°C]

$t_{MP,out}, t_{TP,out}$  ... výstupní teplota proudu [°C]

### 2.1.5 Přenosová rovnice

K určení celkového přeneseného tepelného výkonu ve výměníku tepla se používá přenosová rovnice, která má tvar dle [2]:

$$\dot{Q} = k \cdot A \cdot \Delta T_m \quad (2.7)$$

kde

$k$  ... součinitel prostupu tepla [W/(m².K)]

$A$  ... referenční plocha výměny tepla [m²]

$\Delta T_m$  ... střední teplotní rozdíl [°C]

Za referenční plochu je vždy dosazena plocha, vůči níž je vztažen součinitel prostupu tepla.

### 2.1.6 Součinitel prostupu tepla

Charakterizuje přenos tepla mezi jednotlivými látkami. V nejjednodušším případě, tj. pro jednoduchou rovinou stěnu můžeme uvažovat dle [3]:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda_{wall}} + \frac{1}{\alpha_2}} \quad (2.8)$$

kde

$R$  ... tepelný odpor [K.m².W⁻¹]

$\alpha_1$  ... součinitel přestupu tepla z ohřívací látky do stěny [W.m⁻².K⁻¹]

$\alpha_2$  ... součinitel přestupu tepla ze stěny do ohřívané látky [W.m⁻².K⁻¹]

$\delta$  ... tloušťka stěny [m]

$\lambda_{wall}$  ... součinitel tepelné vodivosti materiálu stěny [W.m⁻¹.K⁻¹]

Ve složitějších případech se postupuje analogicky s výše uvedenou rovnicí, kdy se ve jmenovateli objevují další členy tepelného odporu v závislosti na typu výměníku.

### 2.1.7 Střední teplotní rozdíl

Při průchodu pracovní látky tepelným výměníkem dochází k postupné změně jeho teploty. Křivka popisující tuto teplotní změnu má logaritmický tvar. Rozdíl mezi středními teplotami pracovních látek lze popsat jako střední logaritmický teplotní rozdíl  $\Delta T_{ln}$ . Je závislý na uspořádání toku, který je buďto sou nebo protiproudý. V případě složitějších typů uspořádání proudění např. křížové, kombinované atd. je potřeba střední logaritmický teplotní rozdíl vynásobit korekčním faktorem  $F$ , který pro jednotlivá uspořádání najdeme v literatuře, nebo odečteme z příslušných grafů.

Střední teplotní rozdíl je popsán vztahem dle [1]:

$$\Delta T_m = \Delta T_{ln} \cdot F = \frac{\Delta T_{max} - \Delta T_{min}}{\ln \left( \frac{\Delta T_{max}}{\Delta T_{min}} \right)} \cdot F \quad (2.9)$$

kde

$\Delta T_{ln}$ ... střední logaritmický teplotní spád [-]

$\Delta T_{max}$ ... maximální teplotní rozdíl teplosměnných látek [°C]

$\Delta T_{min}$ ... minimální teplotní rozdíl teplosměnných látek [°C]

$F$ ... opravný součinitel středního logaritmického teplotního rozdílu [-]

### 2.1.8 Podobnostní čísla

Při výpočtech tepelných výměníků se často využívají tzv. podobnostní čísla, která zde budou ve zkratce uvedena. Jsou používána pro zjednodušení výpočtů s využitím teorie podobnosti. Hlavním z nich je Nusseltovo podobnostní číslo, které se získává z teorie podobnosti a následně se z něj dopočítává součinitel přestupu tepla. Nusseltovo číslo vyjadřuje podobnost přenosu tepla konvekcí a vedením v mezní vrstvě tekutiny. V literatuře lze najít velké množství rovnic pro jeho výpočet, obecně však lze říci, že Nusseltovo číslo je závislé na typu výměníku a dalších podobnostních číslech (Reynoldsovo, Grashofovo, Prandtlovo) [1].



## 2.2 Odpadní teplo

Ve většině průmyslových procesů nejrůznějších odvětví, ať už hutnictví, chemie, metalurgie a spousta dalších je generováno jako vedlejší produkt odpadní teplo, které vzniká z nedokonalostí a termodynamických limitů jednotlivých zařízení (obr. 2.1). Poměrně často, přesněji řečeno ve více než 50 % z celkového množství odpadního tepla jde o teplo na nízké potenciální úrovni (do 260 °C dle [5], avšak při určování teplotní hranice se různí autoři poměrně rozcházejí, tudíž není striktně dána, může tedy být lehce vyšší, ale i nižší). Jedná se hlavně o citelné teplo různých odpadních plynů, ale i latentní teplo ve zbytcích hořlavých plynů. Může to být také teplo v chladicí vodě. Jak již název napovídá, jedná se o teplo zmařené, které povětšinou odchází do okolí a dále není nikterak využíváno. Přesné množství odpadního tepla lze pouze stěží odhadovat, avšak různé studie odhadují, že se jedná o 20 až 55 % [6] z použité energie v daném procesu. Ačkoliv některým z tepelných ztrát nelze zabránit, existují zařízení, která dokáží omezit teplo odevzdané do okolí a dále jej znovu využít pro ohřev nebo výrobu elektrické energie či ve formě mechanické práce, což vede k větší efektivitě a s tím související ekonomické ziskovosti daného procesu.



Obr. 2.1 Jaderná elektrárna Dukovany [20]

### 2.2.1 Zdroje odpadního tepla

Všechny zdroje odpadního tepla, jsou obecně označovány jako sekundární zdroje, jelikož již byly přeměněny lidskou činností na požadovaný druh energie ze zdrojů primárních. Snahou odborníků je získat nevyužité teplo z procesů a transformovat jej na použitelný druh energie v některé z dalších možných aplikací viz tabulka 2.1. V zásadě můžeme rozlišovat zdroje odpadního tepla dle jejich potenciálu do tří kategorií, těmi jsou nízko, středně a vysoko potenciální [4].

Potenciál	Příklady zdrojů	Teplota[°C]	Typické využití pro daný potenciál
Vysoký (>650 °C)	Šachtové pece na nikl	1370-1650	Přehřev spalovacího vzduchu
	Elektrická oblouková pec	1370-1650	Generace elektřiny
	Kyslíkový LD konvertor	1200	
	Kelímkové pece na hliník	1100-1200	Transfer do středních teplot a následné využití
	Šachtové pece na měď	760-820	
	Kalící pece	930-1040	Přehřev vsázek do pecí
	Kelímkové pece na měď	900-1090	
	Proces výroby vodíku	650-980	
	Výpary ze spalovny	650-1430	
	Sklářské pece	1300-1540	
	Koksovací pec	650-1000	
	Kupolní pec	820-980	
Střední (260-650 °C)	Výfuky parního kotle	260-380	Přehřev spalovacího vzduchu
	Výfukové plyny turbín	370-540	Výroba elektřiny
	Pec pro tepelnou úpravu	430-650	Přehřev dalších pecí
	Sušicí a vytvrzovací pece	260-590	Přehřev napájecí vody
	Cementářská pec	450-620	Využití v nízko teplotních procesech
	Výfukové plyny pístového motoru	320-590	Organický Rankinův cyklus pro výrobu elektřiny
Nízký (<260 °C)	Spaliny plynových bojlerů	70-260	Ohřev prostor, vody
	Proces parního kondenzátu	50-90	Zvýšení teploty tepelnými čerpadly a následné využití
	Chladicí voda z: žíhacích pecí	70-260	
	vzduchových kompresorů	30-50	
	motorů s vnitřním spalováním	70-120	Organický Rankinův cyklus
	chladicích zařízení	30-40	
	klimatizačních zařízení		
	Sušicí, pečící, vytvrzovací pece	90-240	
	Horké procesní tekutiny	30-230	
	Odpadní voda z ČOV	20-35	

Tab. 2.1 Teplotní rozdělení zdrojů odpadního tepla dle potenciálu [4], [19]

### Nízkopotenciální

Odpadní teplo na nízké potenciální úrovni je takové, jehož teplota se pohybuje od teploty okolního prostředí až do 260 °C [5]. Jedná se o nejčastější formu odpadního tepla v průmyslu (obr. 2.2). Jednou z jeho hlavních předností je jeho množství, kdy je dostupné jako zbytkové teplo v mnoha různých procesech, s čímž také souvisí největší nevýhoda, která se skýtá v nedostatečné teplotě tohoto zdroje. Pakliže teplota nedosahuje cca 60 °C [5] zhoršuje se jeho využitelnost z důvodu nízkého počtu zařízení, které jsou schopny využít při takto nízké teplotě. Opomeneme-li tyto komplikace, skrývá se v tomto druhu tepla obrovské množství nevyužitá energie, poněvadž z celkového množství odpadního tepla zaujímá více než 50 % [6].



Obr. 2.2 Čistírna odpadních vod Brno - Modřice [19]

### **Středněpotenciální**

Jedná se o odpadní teplo se středním potenciálem, což je teplo o teplotě v rozmezí 260 až 650 °C [5]. Nejvyšší mírou jsou zde zastoupeny výfukové plyny různých strojů, nejčastěji motorů, také zde řadíme některé typy pecí pracujících v těchto teplotních hodnotách (obr. 2.3), resp. mírně nad nimi, avšak v důsledku ztrát se odpadní teplo dostává do tohoto pásma.



Obr. 2.3 Cementářská pec [21]



### Vysokopotenciální

Zde se nejčastěji bavíme o průmyslových pecích pro výrobu kovů (obr. 2.4), kde teplota dosahuje opravdu vysokých hodnot. Takto vysoké teploty přinášejí sice vysokou vstupní hodnotu do technologických systémů využití odpadního tepla. Nicméně často s sebou přinášejí komplikace v podobě vysokého znečištění dehtem a dalšími kontaminanty, kvůli kterým jsou možnosti využití tohoto zdroje odpadního tepla omezené [4].



Obr. 2.4 Elektrická oblouková pec [22]

#### 2.2.2 Možnosti použití

Různé zdroje odpadního tepla mají obecně řečeno různé možnosti svého využití. Nelze používat chladicí vodu o teplotě 70 °C pro výrobu elektřiny nebo vyhřívat kancelářské místnosti zbytkovým teplem z tavení oceli, alespoň tedy ne přímou cestou, která bývá zároveň i tou nejefektivnější.

Proto bychom si měli představit základní možnosti použití odpadního tepla, těmi jsou [9]:

1. výroba elektřiny – klasickou, velmi často používanou variantou využití je výroba elektřiny, např. díky technologii Organického Rankinova cyklu (ORC)
2. předehřev – nejčastěji se jedná o předehřev spalovacího vzduchu pro zvýšení celkové efektivity a účinnosti motorů
3. vytápění – používá se nejčastěji pro vytápění jak výrobních tak případně administrativních prostor v daném podniku, nejčastěji za pomoci tepelných čerpadel a tepelných výměníků
4. ohřev vody – v praxi se ohřívá jak průmyslová, tak užitková voda taktéž za pomoci tepelných čerpadel a výměníků

5. trigenerace – tento pojem vyjadřuje kombinovanou výrobu elektřiny, tepla a chladu, kde je možnost vyrábět vše zároveň nezávisle na sobě

### 2.2.3 Využitelnost odpadního tepla

Pro posouzení využitelnosti odpadního tepla je nutné znát jeho zdroj, jehož podoby byly zmíněny výše, a výsledné použití, kterého má být docíleno. Při znalosti těchto základních parametrů, můžeme dále posuzovat využitelnost s ohledem na několik faktorů [4].

#### Faktory ovlivňující využitelnost

Důležitými faktory, které musí být zohledněny jsou [4]:

1. Množství odpadního tepla
2. Teplota odpadního tepla
3. Chemické složení
4. Cena
5. Dostupnost a další faktory

#### Množství odpadního tepla

Mluvíme zde o kvantitativní charakteristice, taktéž výhřevnosti, což je vlastnost, říkající, kolik energie je obsaženo ve zdroji tepla. Přesněji řečeno se jedná o funkci teploty a hmotnostního průtoku [4].

$$\dot{E} = \dot{m} \cdot h(t) \quad (2.10)$$

kde

$\dot{E}$ ... ztráty odpadního tepla [W/s]

$\dot{m}$ ... hmotnostní průtok odpadního tepla [kg/s]

$h(t)$ ... měrná entalpie v závislosti na čase[J]

Ačkoliv je množství odpadního tepla důležitým parametrem pro určování jeho využitelnosti, je třeba brát jej v souvislosti s dalšími charakteristikami. Zvláště pak s jeho teplotou, kdy samostatné množství, avšak ani samotná (vysoká) teplota pro efektivní využití nepostačuje.

#### Teplota odpadního tepla

Někdy se mluví také o kvalitě odpadního tepla, kdy platí čím kvalitnější a tedy teplejší je, tím lépe je využitelný i daný zdroj. Z tohoto důvodu se jedná o klíčový faktor pro posouzení jeho celkové využitelnosti. Teploty se však mohou velmi lišit. Vracející se voda z chladicího obvodu se značí nízkými teplotami okolo 40 – 90 °C, zatímco např. sklářské tavicí pece se pyšní komínovou teplotou přes 1320 °C. K umožnění bezproblémového přenosu tepla je nutné, aby teplota zdroje byla vyšší, než teplota, při které je teplo využíváno.

Rozsah teplot ovlivňuje volbu materiálu tepelných výměníků, kdy by při jeho nesprávné volbě mohlo dojít k nehodě. Koroze a oxidace, jakožto i další chemické jevy se nejvíce projevují za extrémních podmínek, v tomto případě za zvýšených teplot. Pokud zdroj odpadního tepla obsahuje např. žíravé látky, může dojít k rychlému poškození celé soustavy.

Navíc uhlíkové oceli při teplotách nad 425 °C a korozivzdorné oceli pak nad 650 °C začínají oxidovat. Proto je při překročení těchto teplot nutné použití slitin, případně kompozitních materiálů nebo keramiky. Při opravdu vysokých teplotách je možné odpadní teplo nejprve ochladit a až poté jej využít [4].

### Chemické složení

Ačkoliv chemické složení přímo neovlivňuje jak kvantitu, tak ani kvalitu odpadního tepla, je důležitým faktorem při výběru materiálu a způsobu využití. Složení a skupenství odpadního tepla určuje jeho vlastnosti, které pak dále ovlivňují efektivitu využití. Hodnoty přenosu tepla v tepelných výměnících jsou pak také závislé na chemickém složení a skupenství zdrojového odpadního tepla. Tekutiny s vyšší hustotou mají také vyšší součinitel přestupu tepla, který umožňuje dosáhnout většího přenosu tepla na vztaženou jednotku plochy (tabulka 2.2).

Podmínky a typ tekutiny	Součinitel přestupu tepla $\alpha$ [W/m <sup>2</sup> .K]
Voda ve formě kapaliny	$5 \times 10^3$ až $1 \times 10^4$
Organická kapalina	$1,5 \times 10^3$ až $2 \times 10^3$
Plyn (P=1000 kPa)	$2,5 \times 10^2$ až $4 \times 10^2$
Plyn (P=100-200kPa)	$8 \times 10^1$ až $5 \times 10^2$

Tab. 2.2 Součinitel přestupu tepla pro různé tekutiny [4]

Dalším z klíčových faktorů na zvážení je při vytváření systému pro zpracování odpadního tepla interakce mezi chemikáliemi obsaženými např. ve výfukových plynech a materiálem tepelných výměníků v daném systému. Nejenom zde existuje možnost usazování nečistot ve výměnících, což ovlivňuje efektivitu celého procesu a může vést i k jeho selhání, v nejhorším případě i havárii (obr. 2.5). Metod, jak předejít zanášení tepelných výměníků, je velké množství, mimo jiné zahrnují volbu lepšího materiálu, zvětšení teplosměnných ploch nebo také návrh výměníku s ohledem na jeho snadné čištění. I přes tyto možnosti, problém zanášení výměníků zde stále existuje a je potřeba jej brát v potaz [4].



Obr. 2.5 Poškozený výměník [4]

### **Cena**

Důležitým parametrem při zavádění jakéhokoliv systému je cena. Ačkoliv existuje obrovské množství dalších faktorů, tím, který v drtivé většině případů rozhoduje, je cena. V případě systémů pro využití odpadního tepla bychom se však neměli držet pouze ryze ekonomického aspektu věci, kde konkrétní hodnota je poměrně snadno dopočitatelná, avšak hodnoty, která se dá v číslech jen velmi ztěžka odhadovat a tou je ekologičnost daného systému [4].

### **Dostupnost a další faktory**

Několik dalších faktorů určuje využitelnost v požadované aplikaci. K důležitějším patří dostupnost odpadního tepla v určitém časovém období, kdy ne každý zdroj odpadního tepla funguje v nepřetržitém provozu, i přestože požadavky tak mohou být kladeny. V opačném případě máme nepřetržitý zdroj, avšak jeho využití může být omezené, což samozřejmě neprospívá ekonomice provozu. V obou případech může docházet k cyklování zátěže, které nemusí prospívat výměníkům, pakliže se s tímto nepočítalo při jejich návrzích. Ideálním případem je tudíž sehnání zdroje a jeho využití v čase. Mohou se vyskytovat také fyzikální překážky, kdy není možné jednoduše a efektivně odvádět buďto samotné odpadní teplo nebo instalovat systémy pro jeho využívání. Významnou měrou se na jednoduchosti transportu podílí druh odpadního tepla. Například si uveďme potrubní systémy tekutin, které jsou poměrně nenáročné na přepravu v systému. Naproti tomu zdroje vycházející z pevných látek (ingoty, odlitky), které často obsahují obrovské množství energie, je mnohem obtížnější transformovat do využitelné formy, což se potvrzuje v praxi, kdy odpadní teplo z těchto zdrojů není příliš využíváno [4].

## 2.3 *Metody využití odpadního tepla*

V této kapitole jsou uvedeny tři nejčastější technologie pro využití odpadního tepla z průmyslových procesů (tepelné výměníky, čerpadla, ORC jednotky) a také představeny dvě méně známé, avšak zajímavé technologie (tepelné trubice a termoelektrické generátory). Při výběru konkrétní technologie pro využití odpadního tepla je nutné vzít v potaz podmínky v místě instalace a také konečný účel využití energie. Každý typ technologie má své typické vlastnosti, které musejí být zohledněny při jejich výběru. Nalezení vhodného řešení by proto měla předcházet technicko-ekonomická analýza, která by měla zohledňovat jak podmínky v místě instalace, tak investiční i provozní náklady. Většina firem, dodávajících systémy pro využití odpadního tepla nabízí pouze jeden specifický typ technologie. Je proto vhodné kontaktovat více dodavatelů a posoudit různá potenciálních řešení. Chytrou možností se zdá být posouzení provozu nezávislou organizací, která může nabídnout odpovídající řešení pro zadané podmínky [6].

### 2.3.1 Tepelné výměníky

Jednou z nejméně náročných technologií mohou být tepelné výměníky. Je-li výměník správně navržen, umožňuje využití téměř veškerého energetického potenciálu odpadního proudu díky velkému obsahu plochy pro přestup tepla. Přestože existuje mnoho druhů, v kombinaci s nízkopotenciálním odpadním teplem je nejvyužívanější typ deskový výměník. Jeho hlavními přednostmi jsou kompaktnost a zároveň velký výkon díky velkým teplosměnným plochám. Provozem však mohou vzniknout potencionální rizika, například koroze z důvodu kondenzace médií na teplosměnných plochách nebo zanášení. Zcela nové jsou v této oblasti výměníky tepla vyrobené z plastu. Jsou nejen odolné vůči korozi, ale mají také dlouhou životnost. Omezením je maximální pracovní teplota (105 °C) a tlak (1 034,2 kPa), tudíž se nejvíce využívají v oblasti nízkopotenciálního odpadního tepla [6].

#### **Rozdělení výměníků**

Jelikož jsou tepelné výměníky jednou z nejčastějších technologií používanou pro využití odpadního tepla, je vhodné doplnit si jejich rozdělení na základě typu proudění a konstrukce do následujících skupin [7], [8].

#### **Typy výměníků dle vzájemného proudění médií:**

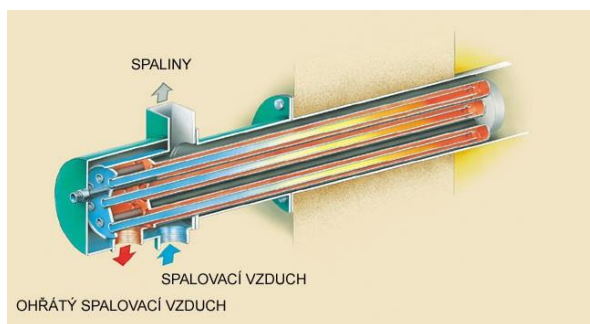
1. **Protiproudé** – média a směry jejich proudů jsou vzájemně rovnoběžné, avšak mají opačný smysl
2. **Souproudé** – média a směry jejich proudů jsou vzájemně rovnoběžné a mají stejný smysl
3. **Křížové** – proudové osy jsou mimoběžné a svírají vůči sobě v kolmém průměru 90°



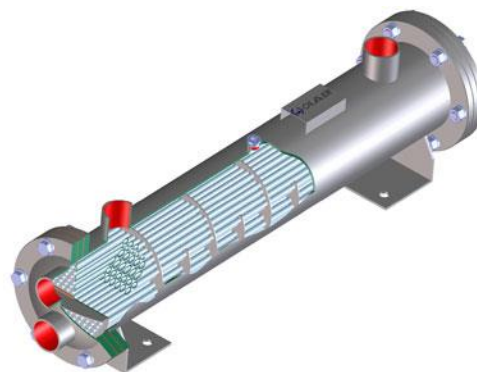
## Typy výměníků dle konstrukčního řešení

### 1. Trubkové výměníky

Jedná se o nejstarší a nejpoužívanější typ výměníků. Z hlediska pevnosti mají výhodný tvar. Skládají se z vnitřních trubek a vnějšího pláště (obr. 2.6 a 2.7). Průtokový průřez trubek bývá 2-3x menší než průtokový průřez mezi nimi. Dále jsou obvykle v mezitrubkovém prostoru umístěny přepážky, které prodlužují trajektorii proudění a zpomalují pohyb vnějšího média. Trubkových výměníků existuje několik provedení (plášťový s rovnými trubkami, dvoutrubkový, vlásenkový), avšak pro účely této práce postačí elementární rozdělení [7].



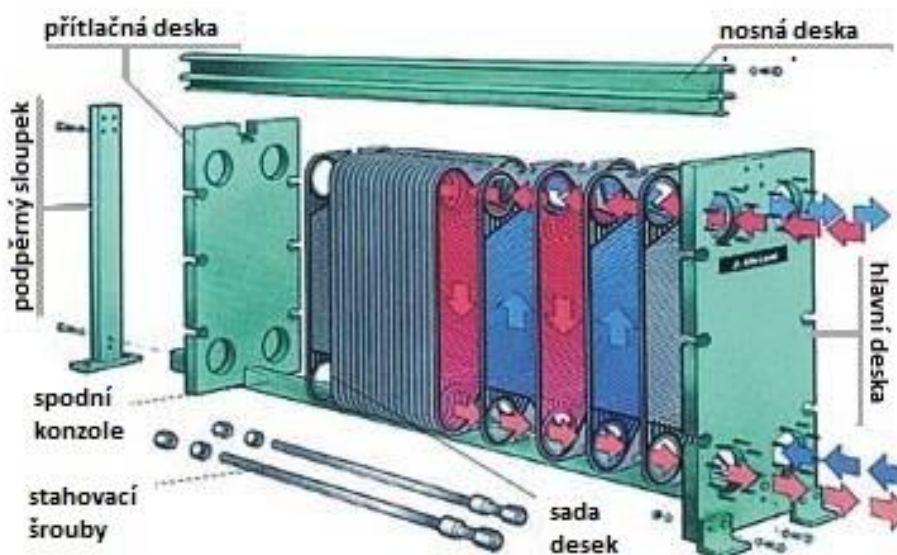
Obr. 2.6 Schéma trubkového výměníku [11]



Obr. 2.7 Trubkový výměník OLAER [12]

### 2. Deskové výměníky

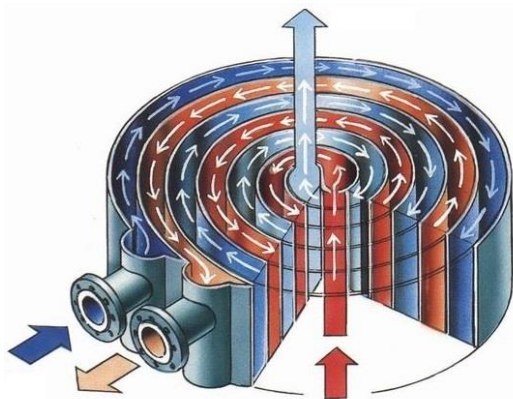
Teplosměnná plocha je tvořena z tenkých kovových desek, které jsou k sobě pevně spojeny pájením, nebo jsou pomocí šroubových svorníků staženy (obr. 2.8). Mezi jednotlivými deskami se nachází těsnění. Na deskách jsou vytlisovány kanálky. První médium proudí jedněmi kanálky, druhé médium poté přilehlými kanálky. Výhodami deskového výměníku jsou jeho kompaktní řešení, čistý protiproud v sousedních deskách a také snadné zvyšování výkonu přiřazením dalších desek. Nevýhodami jsou naopak problémy s dosažením těsnosti při vyšších tlacích a problémy se zanášením při nedostatečné čistotě obou médií [7].



Obr. 2.8 Schéma deskového výměníku [6]

### 3. Spirálové výměníky

Dvě zpravidla protiproudá média proudí u tohoto typu výměníků spirálovitě zakřivenými kanálky (obr. 2.10), kdy platí, že zakřivení těchto kanálků zvyšuje intenzitu přestupu tepla. Princip je znázorněn na obr. 2.9. Teplosměnná plocha je vytvořena z dlouhé svinuté desky, proto tento typ můžeme taktéž zařadit mezi deskové výměníky [7].



Obr. 2.9 Schéma spirálového výměníku [13]



Obr. 2.10 Spirálový výměník Alfa Laval [14]

#### 2.3.2 Tepelná čerpadla

Primárním účelem výroby tepelného čerpadla bylo vytápění prostor. Nízkoteplotní energie jako zdroj využívala okolní vzduch, vodu nebo teplo ze země. Později čerpadla našla využití v ohřevu teplé užitkové vody a v dalších podobných aplikacích (např. podlahové vytápění, ohřev bazénů apod.). Funkce tepelného čerpadla je založena na principu Carnotova cyklu, jenž se využívá v domácích chladničkách a mrazácích. V uzavřeném okruhu se nachází kompresor, kondenzátor, expanzní ventil a výparník. Jako pracovní látka v okruhu se používá chladivo s nízkým bodem varu (obvykle nižší než 0 °C). Nejprve je chladivo v kapalném skupenství zahřáto ve výparníku. Zde taktéž dochází k odpaření chladiva a zároveň k odběru tepla z okolí (obvykle exteriéru). Poté je tento plyn stlačen kompresorem a vpuštěn do kondenzátoru, kde je skupenské teplo předáno opět do okolí (do interiéru nebo topného média). Zkondenzované chladivo se dále vrací zpět do výparníku přes expanzní ventil a celý cyklus se opakuje. Příkladem možného využití může být vytápění administrativních budov v areálu průmyslového závodu, kde se za zdroj energie považuje odpadní teplo z vhodného výrobního procesu. Návratnost investice tepelných čerpadel je při využívání odpadního tepla z průmyslových procesů podpořena zvýšeným topným faktorem (COP), který roste se zvyšující se teplotou využitého odpadního tepla. Například při využití odpadního tepla s teplotou nad 15 °C vzroste COP na hodnotu okolo 4 [6].

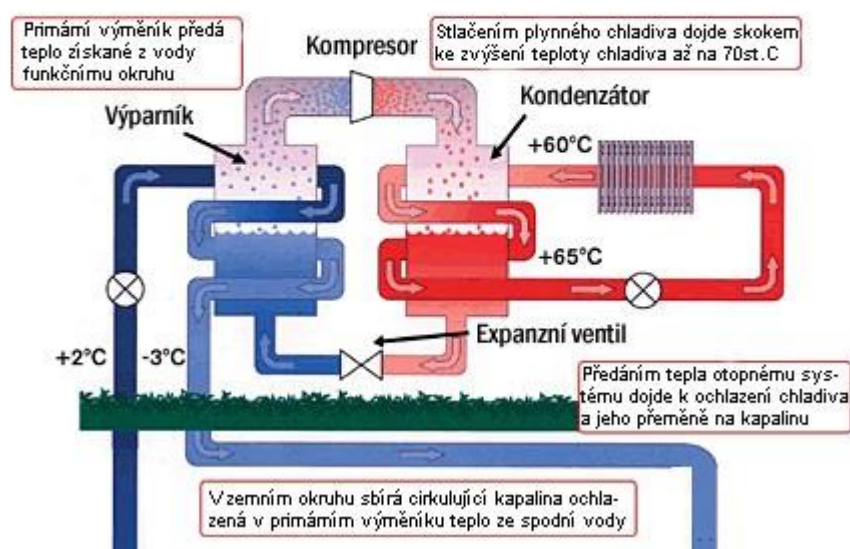
#### Dělení tepelných čerpadel:

Tepelná čerpadla (TČ) jsou společně s tepelnými výměníky jedny z nejčastějších technologií využívaných pro získání využitelné energie z odpadního tepla, proto si představíme jejich nejčastější varianty a principy jejich fungování. Dle primárního zdroje tepla se tepelná čerpadla dělí na následující [15], [16]:

## 1. TČ voda-voda

Teplu je odebíráno z vody, ať už podzemní, tekoucí nebo odpadní. A to buďto přímo, kdy primárním výměníkem voda protéká, nebo nepřímo, kde se na primární straně nachází kolektor, který odebírá teplo z vody. Následně se teplo předává do topné vody. Vzhledem k energetické vydatnosti vody bývá voda nejlepším zdrojem tepla pro TČ, vždy však závisí na kvalitě zdroje vody, který bývá u odpadní vody dobře zajištěn. Výhodou systémů voda-voda je obecně nejvyšší topný faktor z nabízených řešení (obr. 2.11).

### Princip tepelného čerpadla voda - voda

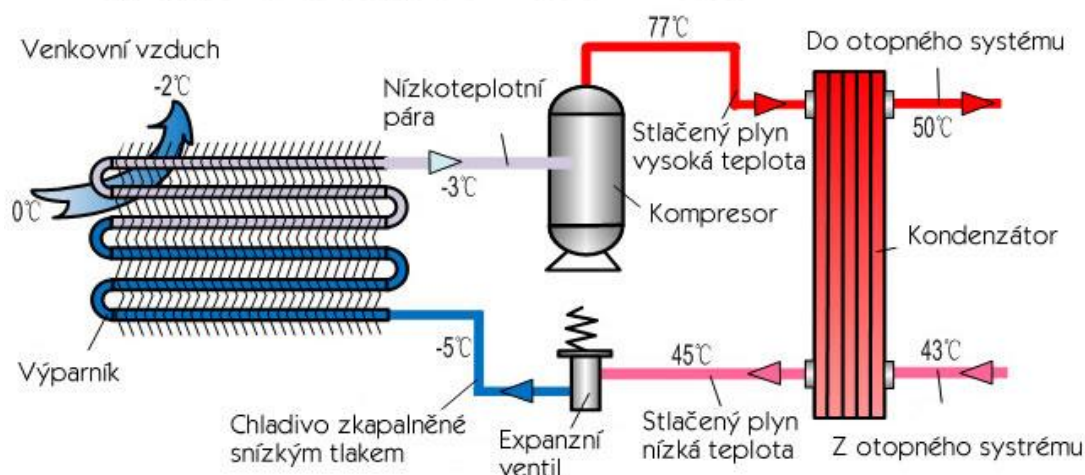


Obr. 2.11 Schéma tepelného čerpadla voda-voda [18]

## 2. TČ vzduch-voda

Odebírá teplo z okolního nebo odpadního vzduchu a předává jej následně opět do topné vody (obr. 2.12). Tento druh čerpadla nemá primární okruh a je tvořen pouze chladivovým a sekundárním okruhem, ve kterém se obvykle nachází trubkový výměník s ventilátorem. Tvary a provedení se různí podle výrobců. Jednou z možných konstrukcí je dvoudílná, neboli TČ split. Vnější a vnitřní část je propojena měděnými trubkami, ve kterých proudí chladivo. Kompresor je umístěn opět podle výrobce buďto uvnitř nebo vně. Dalším možným provedením je tzv. kompaktní čerpadlo, kdy je celá jednotka umístěna venku a propojena potrubím topné vody. Nastávají zde obtíže s vodou v sekundárním výměníku, která při nižších teplotách může za neprovozního režimu zamrznout. I z tohoto důvodu se v posledních letech TČ instalují uvnitř budov, pakliže to prostory dovolují. Vzduch se přivádí izolovanými „rukávy“ nebo potrubím. Přitom je nutné zajistit, aby se vyfukovaný, již ochlazený vzduch, nedostal do sání.

## Princip tepelného čerpadla vzduch - voda



Obr. 2.12 Schéma tepelného čerpadla vzduch-voda [17]

**3. TČ vzduch-vzduch**

Jedná se o málo využívané řešení, které je svou konstrukcí vhodné pro malé výkony a v jednoduché variantě je používáno jako klimatizace místnosti.

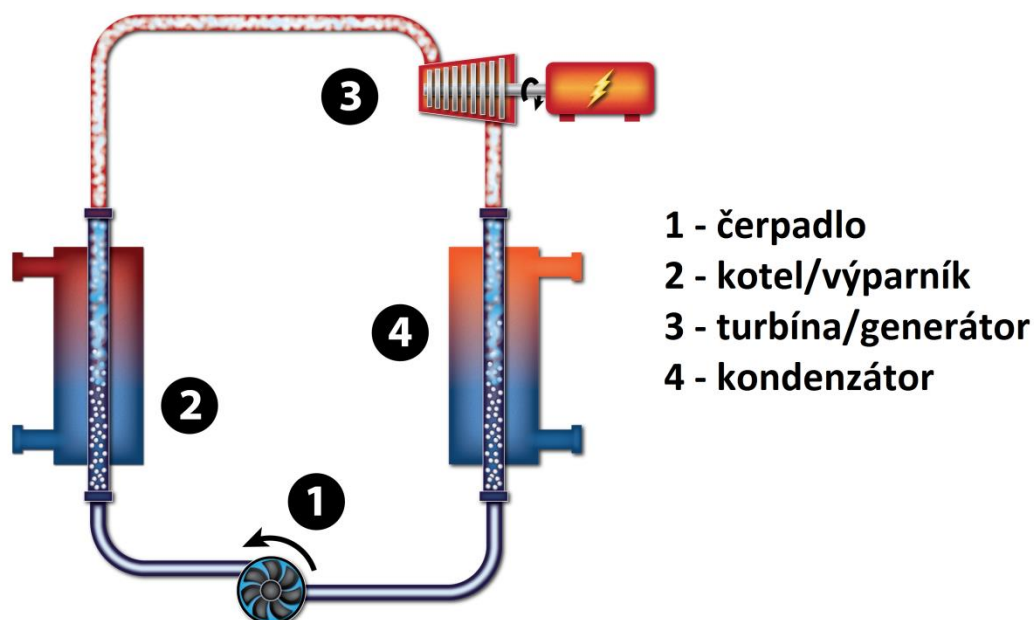
**4. TČ země-voda**

Teplo je odebíráno ze zemské kůry a to pomocí horizontálního nebo vertikálního kolektoru. Teplo je následně předáváno do topné vody.

**2.3.3 ORC jednotky**

Technologií zaměřených na efektivní využití odpadního tepla pro výrobu elektrické energie známe více. Nejznámějšími jsou ORC jednotky (obr. 2.13), které využívají princip Organického Rankinova cyklu. Cyklus probíhá v uzavřeném okruhu, který se skládá z čerpadla, výparníku, kondenzátoru a turbogenerátoru. Jako pracovní látka se používá organická kapalina o nízkém bodu varu (obvykle chladivo nebo lehké uhlovodíky). Pomocí čerpadla je organická kapalina vháněna do výparníku, kde vzniká tzv. organická pára, která se následně rozpíná v turbogenerátoru. Ten je založen na podobném principu jako klasická parní turbína. Tepelná energie se zde přeměňuje na mechanickou a následně díky generátoru na elektrickou. Po průchodu turbogenerátorem pára kondenzuje v kondenzátoru a celý cyklus se opakuje. Ve spojení s nízkopotenciálním teplem se účinnost zařízení pohybuje rozmezí 10 až 20 %. Využití ORC je typické v kombinaci s odpadním teplem z bioplynových stanic [6].





Obr. 2.13 Schéma Organického Rankinova cyklu [23]

#### 2.3.4 Tepelné trubice

Tepelné trubice jsou méně známé tepelně absorpční systémy bez jediné pohyblivé části (vyžadují minimální údržbu). Přenášejí až 100x více tepelné energie než vodiče z mědi, pro které je charakteristická dobrá tepelná vodivost. Tato jednoduchá konstrukce zahrnuje zcela odizolovanou nádobu s pracovní látkou uvnitř. Přiváděním tepla do spodní části nádoby se pracovní látka odpařuje. Páry na chladném konci předávají skupenské teplo do okolí a zkondenzované se vrací zpět po stěnách nádoby do výparné části. Volba pracovní látky ovlivňuje účinnost tepelných trubice. Nejčastější využití najdeme ve vytápění prostor nebo předehřevu vzduchu [6].

#### 2.3.5 Termoelektrické generátory

Materiálem použitým v termoelektrickém generátoru jsou polovodičové pevné látky, díky kterým je možná přímá výroba elektrické energie v závislosti na teplotním rozdílu. Principem těchto systémů je Seebeckův jev, kdy dva polovodičové materiály s různými Seebeckovými koeficienty mezi sebou vytvářejí elektrické napětí vlivem teplotního gradientu v materiálu. Přenosem tepelné energie materiálem se vytváří pohyb částice a za předpokladu, že je okruh uzavřen, vzniká elektrický proud. Dlouhodobá existence termoelektrické technologie má však kvůli nízké účinnosti a vysokým nákladům omezené použití. Většina generátorů má účinnost jen okolo 2 až 5 %. Nicméně termoelektrické materiály jsou stále předmětem intenzivního výzkumu a vývoje. Vytvoření pokročilých termoelektrických materiálů o účinnosti 15 % a více je umožněno díky pokrokům v nanotechnologiích. Je možné je využívat například v kombinaci s odpadním teplem z elektráren k dodatečné výrobě elektrické energie [6].

### 3. PRAKTICKÁ ČÁST

Pro praktickou část bakalářské práce byl vybrán reálný chemický závod společnosti Kemifloc a.s. v Přerově, jenž nevyužíval odpadní teplo ze svých procesů, a především z důvodu ekologického smýšlení vedení společnosti bylo rozhodnuto o změně, která s sebou přinese v dlouhodobém horizontu taktéž finanční úspory.

Autor bakalářské práce se projektu účastnil jako pozorovatel, kdy mu bylo umožněno nahlížet do uskutečněného projektu a příslušné dokumentace.

V následující kapitole bude popsán návrh řešení, který se uskutečnil v roce 2011, zahrnující popis problému se ztrátami budov, dále pak návrh řešení a s ním související finanční návratnosti celé investice.

#### *3.1 Případová studie integrace zařízení na využití odpadního tepla v průmyslovém podniku*

V této kapitole bude uvedena konkrétní aplikace využití odpadního tepla v chemickém závodě.

##### 3.1.1 Popis problému

Jedná se o průmyslový areál s výrobou chemického roztoku. Areál se skládá z administrativní budovy, budovy dílen a skladů a volného prostranství s výrobní technologií. Tepelná ztráta administrativní budovy je cca 40 kW a tepelná ztráta budovy dílen a skladů je cca 20 kW.

Předcházející systém vytápění administrativní budovy byl řešen pomocí multisplitové reverzační klimatizační jednotky Dalkin. Jako bivalentní zdroj tepla byly použity nástěnné elektrické přímotopy. Bod bivalence je -5 °C.

V následující tabulce 3.1 jsou uvedeny zjištěné a vypočtené parametry návrhu projektu. Jak je patrné, výkonová rezerva je 10kW pro pokrytí případných ztrát v systému. Pro výpočet nákladů na vytápění elektřinou byla použita cena dle tehdejšího tarifu 3,10 Kč bez DPH. Pro výpočet nákladů na TČ byl použit tarif D56d.

Parametr	Hodnota
Tepelná ztráta objektu [kW]	60
Průměrná vnitřní výpočtová teplota [°C]	20
Venkovní výpočtová teplota	-12
Vstupní teplota odpadního tepla do TČ [°C]	32
Výstupní teplota odpadního tepla z TČ [°C]	26
Náklady při využití elektřiny [Kč/rok]	74000
Náklady při využití odpadního tepla (TČ) [Kč/rok]	19000
Celkový výkon tepelných čerpadel [kW]	70
Průměrná teplota během topného období [°C]	5,1
Délka topného období [dní/rok]	259
Potřebné teplo pro vytápění [kWh/rok]	24500
Potřebné teplo pro ohřev vody[kWh/rok]	3600
Potřebné teplo celkem [kWh/rok]	28100

Tab. 3.1 Parametry projektu

### 3.1.2 Návrh řešení vytápění

Během výrobního procesu v průmyslovém areálu vzniká energie ve formě odpadního tepla, která byla v současné době nevyužita. Navrhované řešení předpokládá využití této nadbytečné energie jako zdroj tepla pro tepelná čerpadla, který by nahradil stávající topný systém.

Pro budovu dílen a skladů byl navržen teplovodní systém ústředního topení s deskovými radiátory. Jako zdroj tepla pro ústřední topení bylo navrženo tepelné čerpadlo MasterTherm AQM 45l s plynulou regulací výkonu. Tepelné čerpadlo bylo současně uvažováno jako zdroj tepla pro ohřev teplé užitkové vody (TUV) v nepřímotopném zásobníku o objemu 140 l. Tepelné čerpadlo bylo navrženo monovalentně, tzn. bez záložního zdroje.

Pro administrativní budovu bylo uvažováno následující řešení. Teplovodní smyčka ohřívána odpadním teplem z výrobního procesu, na kterou by byla paralelně připojena čtyři tepelná čerpadla voda-vzduch TCH 30. Ohřívání vzduch by byl pomocí rozvodů vzduchotechniky rozváděn po budově. Tepelná čerpadla jsou reversační a proto mohou v letním období objekt chladit a odebrané teplo odevdávat pomocí teplovodní smyčky pro predehřev v technologickém procesu v průmyslovém areálu. Ohřev TUV byl navržen pomocí tepelného čerpadla MasterTherm AQM26Z v nepřímotopném zásobníku TUV o objemu 500 l. Tepelná čerpadla byla navržena monovalentně.

### 3.1.3 Finanční návratnost projektu

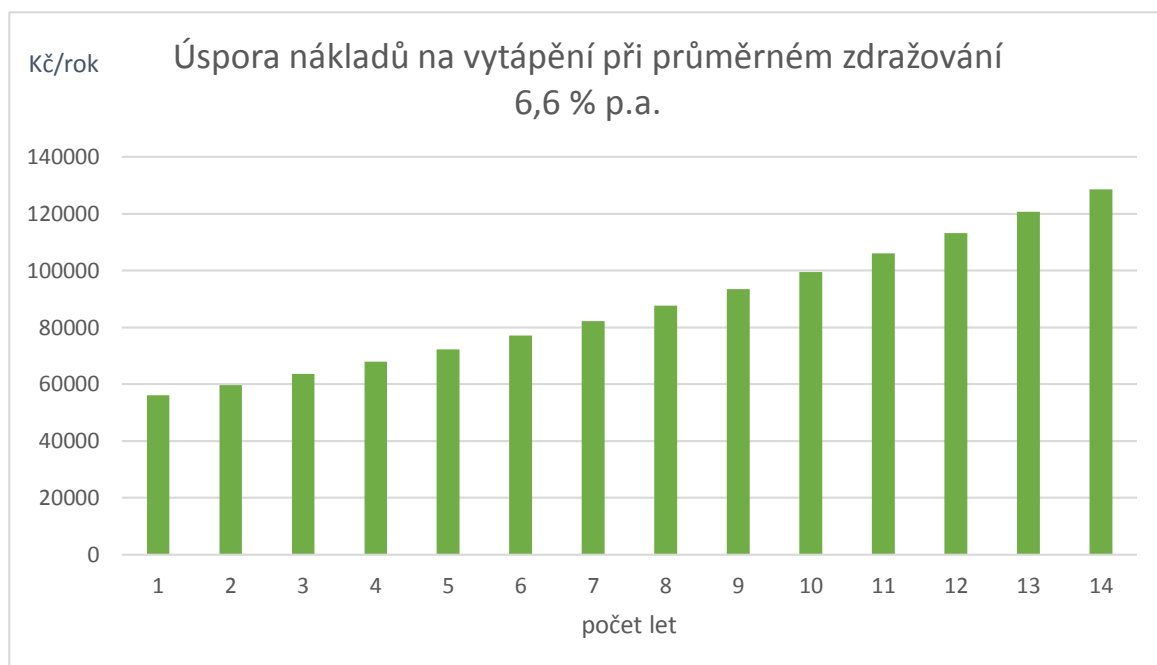
Důležitým faktorem pro finální rozhodování o investici je vždy finanční stránka věci. Nejinak tomu bylo i v tomto případě, proto byl vypracován plán úspory nákladů (obr. 3.1) při započítání průměrného ročního zdražování cen energií o 6,6 %. Jak ukazuje tabulka 3.2 původní náklady na vytápění a ohřev vody se pohybovaly ve výši 74 000 Kč ročně. Po vyhotovení projektu tyto náklady poklesly o nezanedbatelných 74 %.

Na grafu návratnosti investice (obr. 3.2) vidíme, že vstupní investice do technologie se vrátí za necelých 8 let. Opět zde bylo uvažováno s průměrných zdražováním cen energií ve výši 6,6 % ročně. Byla zde srovnávána cena TČ po odečtení úspor vůči elektrokotli, který sloužil jako zdroj ohřevu v minulosti.

V těchto výpočtech samozřejmě nejsou zahrnuty ekologické faktory, jako např. úspora vypouštěného CO<sub>2</sub> a dalších skleníkových plynů. Vyčíslit jejich ekonomickou hodnotu je však velmi problematické.

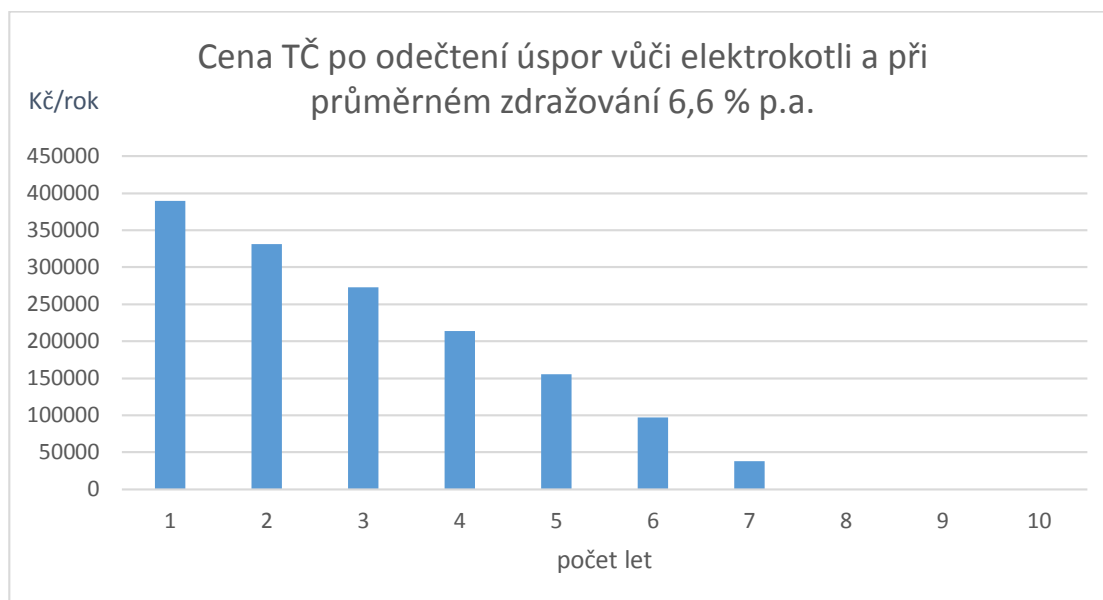
Náklady na energie Kč/rok	19000,--	74000,--
Investice do technologie	390000,--	0,--
Průměrné zdražování energií za rok	6,6 %	-

Tab. 3.2 Přehled nákladů a investic



Obr. 3.1 Úspora nákladů





Obr. 3.2 Návratnost investice

### 3.1.4 Vyhodnocení projektu

Po zvážení finanční a ekologické návratnosti byl projekt schválen a následně vyhotoven dodavatelskou firmou. Následující roky po realizaci projektu potvrdily předpokládané ekonomické úspory.

Firma se zároveň chová velmi zodpovědně k životnímu prostředí. Důkazem je dlouhodobé udržení loga programu Responsible Care (program odpovědného podnikání v chemii zaměřený na ochranu zdraví a životního prostředí). Projekt byl hodnocen kladně a ukázal, že díky redukci spotřeby elektřiny pro vytápění a ohřev vody lze nepřímo snížit zatížení životního prostředí.

V současné době panuje ve firmě spokojenost s využíváním zvoleného systému a je plánována jeho instalace i v zahraničních pobočkách společnosti, které využívají podobnou technologii výroby.

## 4. ZÁVĚR

Úvodní část práce je zaměřena na teoretické seznámení s problematikou přenosu tepla, na niž navazuje shrnutí nejčastějších zdrojů odpadního tepla a rozdělení tohoto tepla do třech úrovní na základě jeho potenciálu. Jsou zde uvedeny typické zdroje pro jednotlivé kategorie. Následující kapitola se zabývá metodami využití odpadního tepla a zahrnuje jak nejčastější technologie pro přímé využití odpadního tepla jako jsou tepelná čerpadla a tepelné výměníky, tak technologie pro výrobu elektřiny, nejčastěji ORC jednotky. V poslední, praktické části práce je na konkrétním příkladu ukázána aplikace využití odpadního tepla jako zdroje energie pro vytápění. Práce tedy nabízí teoretické možnosti využívání odpadního tepla s následnou ukázkou konkrétního příkladu z praxe.

Ačkoliv jsou konkrétní hodnoty odpadního tepla stěží prokazatelné, uniká jej do ovzduší ohromné množství. S pomocí dostupných technologií mohou podniky právě ono jinak zmařené teplo využít a vylepšit si nezanedbatelnou měrou jak svou ekonomickou situaci, tak přispět k lepšímu stavu životního prostředí.

## SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] VDI Heat Atlas. 2nd ed. Berlin: Springer, 2010, xxi, 1585s. ISBN 978-3-540-77876-9
- [2] STEHLÍK, P., KOHOUTEK, J. a NĚMČANSKÝ, J. Tepelné pochody: Výpočet výměníku tepla. 1. vyd. Brno: VUT, 1991, 129 s. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0363-2.
- [3] PAVELEK, M. Termomechanika. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 192 s. ISBN 978-80-214-4300-6.
- [4] BCS Incorporated (2008): Waste Heat Recovery: Technology and Opportunities in U. S. Industry, prepared for the U.S. Department of Energy, Industrial Technologies Program. Dostupné z: [www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste\\_heat\\_recovery.pdf](http://www1.eere.energy.gov/manufacturing/intensiveprocesses/pdfs/waste_heat_recovery.pdf).
- [5] Law, R., HARVEY, A., REAY, D. A knowledge-based system for low-grade waste heat recovery in the process industries. Applied Thermal Engineering [online]. 2016, vol. 94, p. 590-599. Dostupné z: [www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115011503](http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431115011503).
- [6] HAVLÁSEK, M., MÁŠA, V. Využívání nízkopotenciálního odpadního tepla v průmyslu. Energetika, 2016, č. 4/ 2016, s. 114-119. ISSN: 0375-8842.
- [7] BALÁŠ, M. Kotle a výměníky tepla. Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2009. ISBN 978-80-214-3955-9.
- [8] OCHRANA, L. Spalovací zařízení a výměníky tepla. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické, 1993. ISBN 80-214-0529-5.
- [9] Portál [www.oenergetice.cz](http://www.oenergetice.cz). Využití odpadního tepla pro výrobu elektřiny, tepla a chladu [online]. Zveřejněno dne: 27. 8. 2015. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: [www.oenergetice.cz/technologie/teplo/vyuziti-odpadniho-tepla-pro-vyrobu-elektriny-tepla-a-chladu/](http://www.oenergetice.cz/technologie/teplo/vyuziti-odpadniho-tepla-pro-vyrobu-elektriny-tepla-a-chladu/).
- [10] ŠESTÁK, J. a ŽITNÝ, R. Tepelné pochody II: výměníky tepla, odpařování, sušení, průmyslové pece a elektrický ohřev. Vyd. 2. V Praze: Nakladatelství ČVUT, 1997. ISBN 80-01-03475-5.
- [11] OHNÚT spalovací technika s.r.o. Rekuperátor Extern-a-Therm [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: [www.ohnut.cz/recuperator-eat](http://www.ohnut.cz/recuperator-eat).
- [12] KOSTECH s.r.o. Trubkové výmenníky tepla [online]. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: [www.kostech.sk/clanok/75/trubkove\\_vymenniky\\_tepla.html](http://www.kostech.sk/clanok/75/trubkove_vymenniky_tepla.html).
- [13] HOFFMAN, P. Výměníky tepla [online]. Studijní materiály. [cit. 2016-04-15]. Dostupné z: [www.users.fs.cvut.cz/pavel.hoffman/PREDMETY/ZSVZ/Foto/Vymeniky%20tepla/v09-Spiralovy%20vymenik-2.JPG](http://www.users.fs.cvut.cz/pavel.hoffman/PREDMETY/ZSVZ/Foto/Vymeniky%20tepla/v09-Spiralovy%20vymenik-2.JPG).

- [14] Canaley Process Equipment, LLC. Spiral Heat Exchangers [online]. [cit. 2016-05-10]. Dostupné z: <[www.canaley.com/products/heat-exchangers/alfa-laval/spiral-heat-exchangers/](http://www.canaley.com/products/heat-exchangers/alfa-laval/spiral-heat-exchangers/)>.
- [15] TERA VÍK, A. Stavíme tepelné čerpadlo. Kroměříž: Vydáno vlastním nákladem, 2003. 312 s. ISBN 80-239-0275-X.
- [16] TINTĚRA, L. Tepelná čerpadla. Praha: ABF, a.s. - Nakladatelství ARCH, 2003. 121 s. ISBN 80-86165-61-2.
- [17] Ekompex marketing s.r.o. Tepelná čerpadla vzduch-voda [online]. [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <[www.topeni-topenari.eu/topeni/topidla-alternativni/tepelna-cerpadla/vzduch-voda.php](http://www.topeni-topenari.eu/topeni/topidla-alternativni/tepelna-cerpadla/vzduch-voda.php)>.
- [18] Ekompex marketing s.r.o. Tepelná čerpadla voda-voda [online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <[www.topeni-topenari.eu/topeni/topidla-alternativni/tepelna-cerpadla/voda-voda.php](http://www.topeni-topenari.eu/topeni/topidla-alternativni/tepelna-cerpadla/voda-voda.php)>.
- [19] Brněnské vodárny a kanalizace, a.s. [online]. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: [www.bvk.cz/o-spolecnosti/odvadeni-a-cisteni-odpadnich-vod/cov-brno-modrice/](http://www.bvk.cz/o-spolecnosti/odvadeni-a-cisteni-odpadnich-vod/cov-brno-modrice/).
- [20] Občanská bezpečnostní komise při jaderné elektrárně dukovany. Dukovany stále patří k nejlépe provozovaným jaderným [online]. Zveřejněno dne: 24. 4. 2014. [cit. 2016-05-14]. Dostupné z: <[www.obkjedu.cz/aktuality/dukovany-stale-patri-k-nejlepe-provozovanym-jadernam/](http://www.obkjedu.cz/aktuality/dukovany-stale-patri-k-nejlepe-provozovanym-jadernam/)>.
- [21] Česká asociace odpadového hospodářství. Lze odpad energeticky využít i jinde než ve spalovnách? [online]. Zveřejněno dne: 13. 8. 2014. [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <[www.caoh.cz/odborne-clanky-a-aktuality/lze-odpad-energeticky-vyuzit-i-jinde-nez-ve-spalovnach.html](http://www.caoh.cz/odborne-clanky-a-aktuality/lze-odpad-energeticky-vyuzit-i-jinde-nez-ve-spalovnach.html)>.
- [22] Institut geologického inženýrství, Hornicko-geologická fakulta při VŠB Ostrava. Výroba železa a oceli [online]. [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <[www.geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyroba\\_zeleza.html](http://www.geologie.vsb.cz/loziska/suroviny/vyroba_zeleza.html)>.
- [23] Green Thermal Energy Technologies. Organic Rankine Cycle [online]. [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <[www.g-tet.com/content\\_sub.php?id=1](http://www.g-tet.com/content_sub.php?id=1)>.

## SEZNAM OBRÁZKŮ A TABULEK

Obr. 2.1	Jaderná elektrárna Dukovany [20]	s. 16
Obr. 2.2	Čistírna odpadních vod Brno - Modřice [19]	s. 18
Obr. 2.3	Cementářská pec [21]	s. 18
Obr. 2.4	Elektrická oblouková pec [22]	s. 19
Obr. 2.5	Poškozený výměník [4]	s. 22
Obr. 2.6	Schéma trubkového výměníku [11]	s. 24
Obr. 2.7	Trubkový výměník OLAER [12]	s. 24
Obr. 2.8	Schéma deskového výměníku [6]	s. 24
Obr. 2.9	Schéma spirálového výměníku [13]	s. 25
Obr. 2.10	Spirálový výměník Alfa Laval [14]	s. 25
Obr. 2.11	Schéma tepelného čerpadla voda-voda [18]	s. 26
Obr. 2.12	Schéma tepelného čerpadla vzduch-voda [17]	s. 27
Obr. 2.13	Schéma Organického Rankinova cyklu [23]	s. 28
Obr. 3.1	Úspora nákladů	s. 31
Obr. 3.2	Návratnost investice	s. 32
Tab. 2.1	Teplotní rozdělení zdrojů odpadního tepla dle potenciálu [4], [19]	s. 17
Tab. 2.2	Součinitel přestupu tepla pro různé tekutiny [4]	s. 21
Tab. 3.1	Parametry projektu	s. 30
Tab. 3.2	Přehled nákladů a investic	s. 31